

트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 판재의 저속 충격 특성 연구

정창균*, 성대용*, 양동열#, 김진석**, 안동규***

Low Velocity Impact Behavior of Metallic Sandwich Plate with a Truss Core

Chang Gyun Jung*, Dae-Yong Seong*, Dong-Yol Yang#, Jin-Suck Kim** and Dong-Gyu Ahn***

ABSTRACT

Metallic sandwich plate with a truss core has metallic inner structures which have low relative density between a pair of metal skin sheets or face sheets. In this work, low impact tests have been carried out to examine the behavior of sandwich plates with a pyramidal truss core. For the low velocity impact, the impact apparatus of drop weight type has been fabricated. From the results of the experiments, maximum energy absorption is found to happen when the upper sheet fails. The sandwich plate loses its absorption ability as soon as the inner structures have been crashed completely and optimal core thickness has existed to maximize energy absorption. Comparing the metallic sandwich plate with the monocoque plate, the absorbed energy has been improved up to 160 % and the deflection decreased by up to 76%. As a result, the metallic sandwich plate with a truss core is shown to have good material for impact resistance and energy absorption.

Key Words : metallic sandwich plate(금속 샌드위치 판재), pyramidal truss core(피라미드형 트러스 심재), low velocity impact(저속충격), energy absorption (에너지 흡수량)

기호설명

m = mass of impact head

g = gravity

h = height of head

E_{in} = input energy

E_i = impact absorption energy at i^{th}

v = impact velocity

P = impact load

δ = deflection

Ω = energy absorption ratio

1. 서론

화석에너지의 고갈 및 수요급증으로 인해 에너지 절감은 모든 산업에서 가장 중요한 이슈 중의

접수일: 2006년 6월 3일; 게재승인일: 2006년 8월 31일

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

** 조선대학교 기계설계공학과 대학원

*** 조선대학교 기계설계공학과

하나가 되고 있다. 따라서 효율적 에너지 사용을 위해 제품의 경량화가 절실히 요구되고 있으며 샌드위치 판재는 대표적 경량화 재료로 이미 다양한 곳에서 사용되고 있다.

이중 금속박판을 면재(face sheet)하고 저밀도 금속을 심재(core)로 하는 금속 샌드위치 판재는 금속 구조재가 사용되는 환경에서 쉽게 대체될 수 있어 경량재료로서 매우 유용하다. 또한 금속이 가지는 소성변형특성으로 인해 에너지흡수율이 높아 내충격재료로의 활용이 기대된다. 사용되는 심재로는 알루미늄 허니컴(honeycomb), 금속 폼(metal foam), 경량금속, 트러스형 구조물과 같은 다양한 재료를 복합적으로 이용되고 있다.¹⁻³

트러스형 구조를 심재로 사용하는 트러스형 금속 샌드위치 판재는 허니컴 또는 메탈 폼 재료와는 달리 개방형 구조로 특징 지워진다. 개방형 구조의 심재는 샌드위치 판재의 내부공간을 활용할 수 있다는 측면에서 큰 장점을 가진다

Wick⁴ 등은 사면체 구조를 가지는 트러스로만 제작된 트러스 판과 트러스를 내부에 가지는 트러스형 샌드위치 판재의 정적 특성을 비교 분석하여 트러스형 샌드위치 판재가 무게 관점에서 매우 우수함을 보였다. Jung⁵ 등은 자동차등의 구조재료로 활용이 용이하도록 3 mm 이하의 얇은 트러스형 금속 샌드위치 판재를 제작 및 실험하여 경량화 정도를 규명하였다.

한편 금속 샌드위치 판재가 구조재료로의 활용성이 높아짐에 따라 충격거동과 이에 따른 파괴에 대한 관심이 높아져 많은 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하였다.⁶⁻⁷ 그러나 트러스형 금속 샌드위치 판재의 경우 충격특성 및 이와 관련된 이론적 혹은 실험적 연구는 매우 드물다. 최근 Radford⁸ 등이 피라미드 구조를 가지는 샌드위치 빔이 폭발에 의한 쇼크(shock)를 받을 때의 저항성 정도를 실험을 통해 보고한 바 있다. 그 결과 폭발에 대한 변형이 일반 판재보다 적어 내 충격재료로서 우수한 특성을 가짐을 보고하였다. 그러나 금속재의 충격거동은 속도에 따라 그 현상이 매우 다르며 실재 낙하충격, 저속충돌과 같은 저속충격에 대한 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구에서는 트러스형 금속 샌드위치 판재가 저속에서 충격을 받을 때의 특성을 실험적 연구를 통해 고찰하여 내충격 재료로서의 트러스형 샌드위치 판재의 가능성을 관찰하고자 한다.

2. 트러스형 샌드위치 판재의 제작

본 연구에서는 트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 판재를 제작하기 위해 익스팬디드 메탈(expanded metal)을 절곡(crimping)하여 사용하였다. 익스팬디드 메탈은 금속박판을 전단한 후 전단방향으로 확장하여 만들어지는 사각 금속망으로 추가공정 및 재료의 손실 없이 연속적으로 사각금속망을 제작할 수 있다. 익스팬디드 메탈의 제작개요를 Fig. 1 에 나타내었다. 우선 삼각형 형태의 금형이 수직방향(-z)으로 내려와 박판을 찢는다(step 1). 이후 금형은 원위치 하게 되고(step 2) 박판은 y 축과 x 방향으로 단위 길이만큼 이동하게 된다. 동일과정을 1 회 더 반복하면(step 4), 한 열의 사각 금속망이 완성된다(step 5). 이와 같은 과정을 반복하여 연속적으로 사각 금속망을 만들 수 있다.

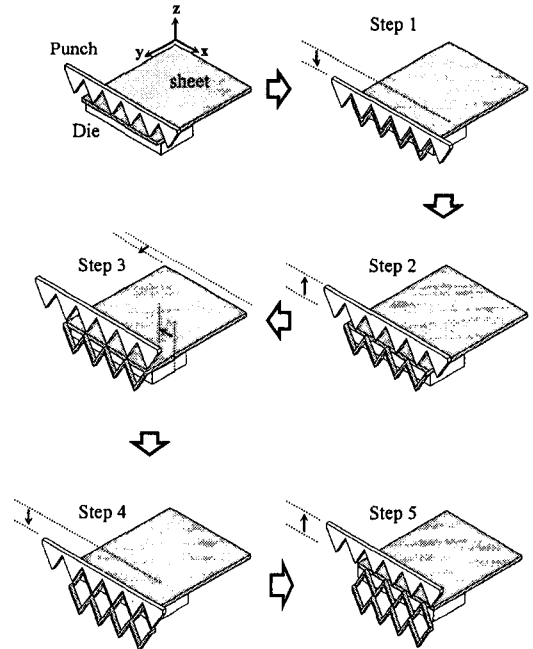


Fig. 1 Schematic diagram for fabrication of expanded metal

이러한 익스팬디드 메탈은 상용화된 공정으로 매우싼 가격에 다양한 재료를 가공하여 판매되고 있으며 KS 규격화 되어 있다.⁹

한편 익스펜디드 메탈과 같은 사각금속망은 대각선 방향으로 절곡(crimping)하면 피라미드 형상을 가지는 트러스 구조를 만들 수 있다. 절곡공정은 Wadley¹⁰ 에 의해 제안되었으며 가장 간편하게 트러스 구조를 성형할 수 있다. 절곡공정의 개략적 그림을 Fig. 2(a)에 나타내었으며 절곡 시 사용된 간이 절곡금형을 Fig. 2(b)에 나타내었다.

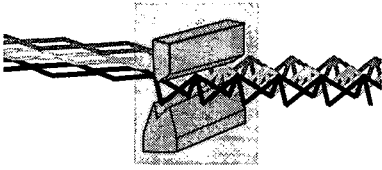


Fig. 2(a) Schematic diagram of the crimping process

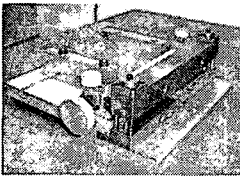


Fig. 2(b) Apparatus for crimping

제작된 트러스 구조는 다양한 방법으로 금속 면재와 접합이 되며 본 연구에서는 접착제 접합을 이용하여 면재와 접합한다. 접착제는 적절한 인성을 부여하기 위해 YD-128 BPA 형 에폭시에 KR-208 NBR 변성타입 에폭시를 6:4의 비율로 혼합하여 사용하였다. 접착면은 기계적 연마 방법인 샌드블래스팅(sandblasting)을 이용하였다. 연마입자의 크기는 80 grit 이다. 접착제의 도포두께는 약 0.8 mm ~ 1 mm 이다. 적절한 경화를 위해 평균 300 kPa 크기로 가압한 후 12 시간의 상온경화 후 80 °C 에서 한 시간의 후경화를 수행하였다.

3. 저속충격특성

충격거동을 관찰하기 위해 적절한 특성치를 정의하여 비교해야 한다. 본 연구에서는 다음과 같이 충격흡수량, 충격흡수율, 그리고 충격에 대한 변형량을 충격평가 특성치로 설정하였다.

3.1 충격에너지 흡수량 및 흡수율

낙하시험에서는 일정질량을 가진 헤드를 특정

높이에서 자유낙하시켜 충격을 준다. 이러한 자유낙하형식의 초기 입력에너지는 자유낙하 시 가이드의 마찰을 무시하면 식 (1) 과 같이 헤드의 초기 위치 에너지로 계산 될 수 있다.

$$E_{input} = mgh \quad (1)$$

충격 전후의 충격흡수율은 낙하추의 충격 직전 및 직후 속도를 측정하여 식 (2)와 같이 충격 에너지를 계산할 수 있다.

$$E_i = E_{i-1} + \frac{1}{2}m(v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (2)$$

변위에 따른 충격흡수율을 계산하기 위해서는 실험장치로부터 하중과 변위를 얻어 식 (3)과 같이 적분하여 구할 수 있다.

$$E_{absorp} = \int Pd\delta \quad (3)$$

적분을 통해 얻어지는 흡수에너지는 낙하추의 속도를 측정할 필요가 없고 변형량에 따른 충격흡수율의 변화를 연속적으로 관찰할 수 있다는 점에서 유리하며 본 연구에서도 식 (3)을 이용하여 변형량에 따른 충격흡수에너지를 얻었다.

한편 입력된 에너지에 대한 흡수된 충격에너지의 비를 충격흡수율로 정의하였으며 이를 식 (4)에 나타내었다.

$$\Omega = \frac{E_{absorp}}{E_{input}} \times 100 \quad (4)$$

3.2 충격변형량

일반적으로 자동차가 충돌할 경우 충돌부가 변형하면서 충격에너지를 변형에너지로 소산시킨다. 반면 승객이 타고 있는 실내공간은 충격에 의한 변형이 최대한 배제 되어야만 승객의 안전을 보장할 수 있다. 이와 같이 내충격재는 충분한 변형을 통해 충격에너지를 흡수하고 공간보호를 위해서는 필요이상의 변형이 발생하지 않아야 하는 특성을 가지고 있다. 따라서 충격량과 함께 충격부재의 변형량을 비교하는 것 역시 충격특성 규명에 있어 매우 중요한 일이다. 본 연구에서는 충격중 발생하는 변형량을 측정하여 비교함으로써 충격저항에 대한 정도를 비교 판단하였다. 부재의

변형량의 측정 기준을 Fig. 3 에 나타내었다.

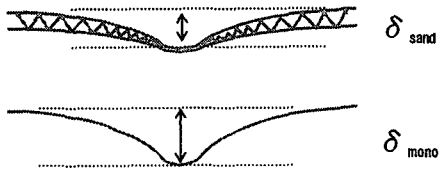


Fig. 3 Measurement of deflection after impact

4. 충격시험

4.1 충격시편제작

충격시험을 위해 2 장에서 설명된 방식으로 시편을 제작하였으며 이를 Fig. 4 에 나타내었다.

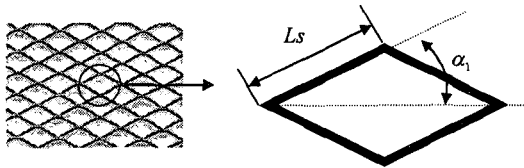


Fig. 4(a) Geometry of metal mesh

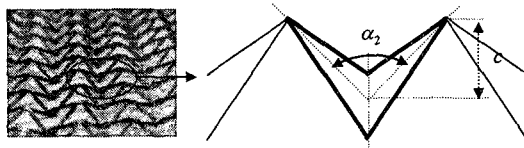


Fig. 4(b) Geometry of pyramid structure

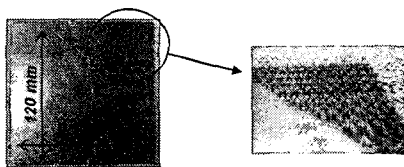


Fig. 4(c) Example of a test specimen

절곡에 사용된 사각금속망은 상용 익스펜디드 메탈로 한변의 길이(L_s) 4.5 mm 이고, 내각(α_1)이 27.3°로 제작되었다. 사각금속망의 절곡각(α_2)은 90°, 120°, 150°로 하여 피라미드 구조를 제작하였다. 제작된 피라미드 구조는 접착제 접합을 통해

면재(face sheet)에 접합되었다. 면재는 두께가 0.3 mm 인 SUS 304 를 사용하였다. 3 가지의 절곡각에 대하여 제작된 피라미드 구조의 두께는 각각 3.5 mm, 2.7 mm, 2.2 mm 이다. 시편의 크기는 한 변의 길이가 120 mm 인 정방형으로 제작되었다.

한편 샌드위치 판재의 충격특성을 비교하기 위해 샌드위치 판재의 이론적 무게가 가장 유사하도록 가로 및 세로의 길이가 120 mm 이며 두께가 0.7 mm 인 SUS 304 로 선정하여 동일한 방법으로 시험하였다.

Table 1 Geometry of test specimen

	Sandwich plate			Monocoque
	90°	120°	150°	Plate
Average thickness [mm]	3.5	2.7	2.2	0.7
Average weight [g]	84			80

4.2 충격시험기 및 충격시험

트러스형 샌드위치 판재의 충격시험을 수행하기 위해 낙하(drop weight)방식의 충격시험기를 사용하였다. 충격하중을 측정하기 위해 낙하추 상부에는 5 톤 용량의 로드셀을 장착하였으며 충격부의 변위를 측정하기 위해 모서리에 최대 변위가 75 mm 인 LVDT 를 장착하여 실시간으로 데이터를 수집할 수 있도록 하였다. 제작된 충격기는 최대 충격에너지가 800 J 이며 최대 변위는 2000 mm 이다. 사용된 충격시험기를 Fig. 5 에 나타내었다.

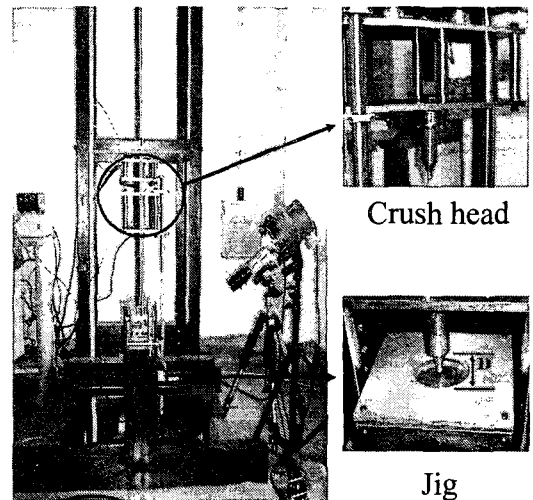


Fig. 5 Apparatus for the impact test (D = 80 mm)

충격시편을 위치시키기 위해 사각판과 사각박스 형상의 상하 지그셋(jig set)을 제작하였다. 판재의 주위를 완전히 구속한 인장(stretching)형 구속조건을 주기 위해 상하 지그사이에 탄성체를 삽입하고 네 귀퉁이에 토크렌치를 이용하여 동일한 압력으로 결합하였다. 충격부는 상하 지그에 지름 80 mm 크기의 구멍을 뚫어 충격부의 공간을 확보하였다.

충격시험에서 헤드의 무게는 11.1 kg 이며 충격 헤드의 지름은 10 mm 이다. 충격높이는 30 mm 부터 42 mm 까지 변화를 주며 실험하였다. 시험 시편 중 육안검사를 통해 현저히 상태가 나쁘거나 충격 후 경계부에 주름이 발생한 경우는 실험결과에서 배제하였다.

5. 실험결과

5.1 파손 및 변형특성

저속 충격에 대한 샌드위치 판재의 파손특성을 알아보기 위해 다양한 높이에서 충격시험을 수행하였다. 양면에 존재하는 면재 중 타격방향의 면재에서 파손이 발생함과 동시에 에너지 흡수량이 현저히 감소하였다. 따라서 최대 에너지 흡수량은 상부 면재가 파손되는 시점에서 얻어질 수 있었다. 상부판재가 파손 후 하부 판재의 파손 시점까지는 2~3 J 의 추가 에너지가 소모되었으며 그 후 판재는 관통되었다. 각각의 변형형상을 Fig. 6 에 나타내었다.

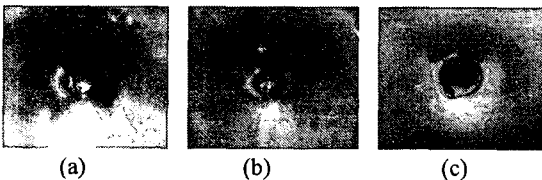


Fig. 6 Failure mode (a) no failure, (b) upper sheet failure (impact side), (c) lower sheet failure (penetration)

평균 입력에너지, 평균 충격흡수에너지 및 충격흡수율 및 최대하중을 Table 2 와 Fig. 7 에 나타내었다. 3 가지 두께의 시편 중 2.7 mm 에서 충격흡수율과 최대하중이 모두 최대가 되었다. 그래프의 경향을 볼 때 두께 2.2 mm 와 두께 3.5 mm 사이에서 충격흡수율과 충격하중을 최대로 하는 두께가 존재함을 추측할 수 있다. 일반적으로 샌드위치 판재

는 심재의 두께가 증가하면 강도 및 비강성은 증가하게 된다.¹¹ 따라서 정적하중을 기준으로 샌드위치 판재를 설계할 때에는 주어진 조건에서 심재의 높이를 최대로 하여 제작하게 된다. 그러나 저속 충격실험을 통해 트러스형 샌드위치 판재는 두께가 증가하면 일정 수준의 충격흡수율과 최대 하중은 항상을 보이다가 다시 감소되는 경향을 보이고 있다. 이는 정적 특성과는 다른 경향으로 충격흡수를 목적으로 하는 샌드위치 판재의 설계 시 추가로 고려해야 할 사항이다.

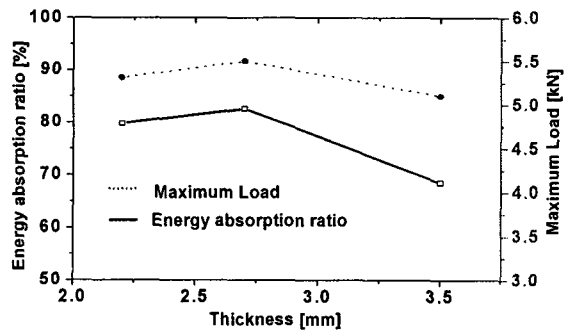


Fig. 7 Average energy absorption ratio and maximum load with respect to thickness

Table 2 Results of experiments

t [mm]	Input Energy[J]	Absorption Energy[J]	Absorption ratio[%]
2.2	37.55 ±1.65	30.30 ±2.40	79.75 ±8.55
2.7	35.95 ±2.15	29.25 ±1.85	82.55 ±6.45
3.5	39.00 ±2.00	27.10 ±2.30	68.45 ±8.55

충격 후 시편의 길이에 따른 두께변화의 예를 Fig. 8 에 나타내었다. 측정된 시편은 90° 로 절곡된 피라미드 구조를 내부구조로 하는 시편을 이용하였는데 이는 이 시편이 가장 두꺼운 시편이므로 두께변화를 가시화 하는데 가장 용이하기 때문이다. 중앙의 충격지점을 원점으로 하여 시편바깥쪽으로 두께 변화를 0.5 mm 간격으로 측정하였다. 충격 후 시편의 두께는 충격부 10 mm 내외에서 급격한 감소를 보이지만 이 영역을 벗어나면 거의 두께가 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 수행된 국부가격에 의한 낙하실험은 심재의 변형을 유도하여 충격흡수량을 높이려는

금속 샌드위치 구조의 장점을 충분히 반영하지 못하는 단점이 있으며 향후 실험조건을 변화하여 그 특성을 충분히 반영하여야 할 것이다.

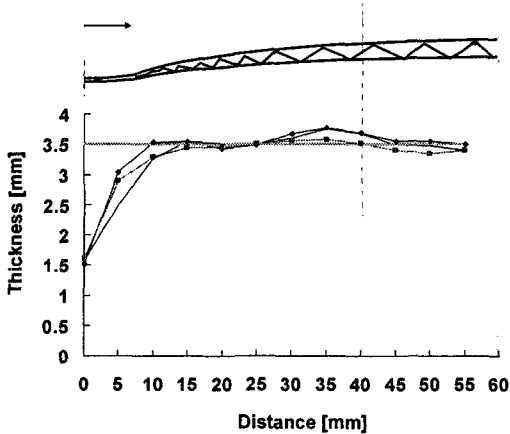


Fig. 8 Thickness variation with respect to distance

또한 지그의 바로 직전인 약 35 mm 부근에서 두께가 증가하며 면재와 심재가 분리된 것으로 판단된다. 이는 충격시 면재와 심재의 두께방향으로의 변형이 균일하지 않아 상하 면재의 유입량이 달라지게 되고 이에 따라 발생하는 층간 전단응력에 의해 박리가 발생한 것으로 생각할 수 있다.

한편 각 시편 별 평균에 대한 오차범위는 평균값의 10% 이내이다. 비교적 편차가 큰 이유는 수작업으로 진행되는 접착제의 도포 시 그 두께에 따라 변형 형태가 다르게 나타나기 때문으로 생각된다. 이는 공정연구를 통해 개선되어야 할 사항이다.

5.2 변형에 따른 충격특성치 비교

낙하높이 34 mm 일 때 두께 3.5 mm 를 가지는 샌드위치 판재와 동일 재료(SUS 304)이고 두께가 0.7 mm 인 일반판재와 비교한 그래프를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 실선은 샌드위치 판재를, 점선은 일반판재의 충격변형특성을 나타낸다. 점 C 를 기준으로 영역 A 에서는 동일 변형대비 에너지흡수율이 높은 반면, 영역 B 에서는 샌드위치 판재와 일반판재가 유사하거나 약간 낮은 경향을 나타낸다. 이는 초기 충격 시 샌드위치 판재가 내부구조의 소성변형으로 인해 충격흡수량이 상대적으로 우위에 있으나 트러스 내부구조가 완전히 붕괴 후

에는 샌드위치 판재의 특성이 사라지게 되므로 무게가 유사한 일반판재와 비슷한 충격흡수율을 보인다고 볼 수 있다. 따라서 샌드위치 판재는 심재인 트러스 구조가 완전 붕괴되는 점 C 에서 그 특성을 완전히 상실한다. 점 C 는 샌드위치 판재의 충격거동에 대한 한계를 결정하는 특이점으로 생각할 수 있으며, 또한 이러한 특이점이 이론 혹은 해석적으로 규명될 경우 샌드위치 판재의 충격 한계를 예측하는 기준으로 사용 될 수 있을 것으로 본다.

특이점 이내에서 변형량 3 mm 부근에서 에너지 흡수 정도를 비교하였다. 비교된 판재는 두께 3.6 mm 의 샌드위치 판재와 0.7 mm 의 일반판재이며 이를 Fig. 10 에 나타내었다

동일 변위에서 흡수된 에너지 흡수량은 샌드위치 판재가 2.58 J 인 반면 일반판재는 1.62 J 로 유사무게의 일반강판 대비 약 160% 의 충격흡수 개선 정도를 나타내었다. 한편 2 J 의 동일에너지 흡수량을 발생시킬 때 충격변형은 샌드위치 판재가 2.5 mm 인 반면 일반판재는 3.27 mm 의 변형량을 보인다.

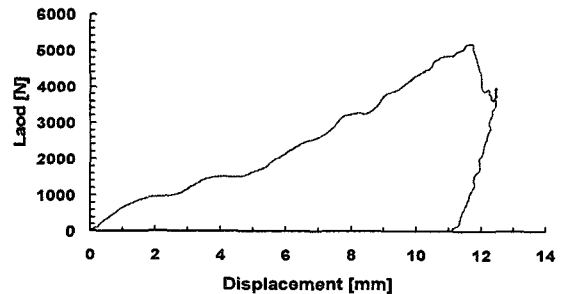


Fig. 9(a) Example of test results; load with respect to displacement (90° crimped sandwich plate)

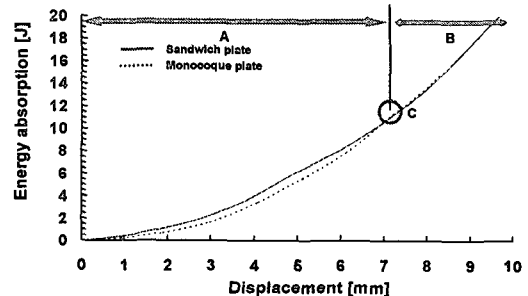


Fig. 9(b) Example of test results; energy absorption with respect to displacement

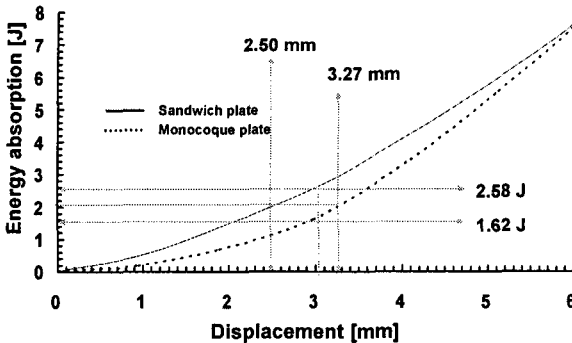


Fig. 10 Comparison between the sandwich plate and the Monocoque plate

일반판재에 비해 같은 에너지를 흡수하면서도 변형은 76 % 정도로 변형량이 매우 적다. 이는 샌드위치 판재가 충격을 받을 때 상부 면재를 통해 전달된 충격에너지가 심재로 전달되면 심재가 상대적으로 약한 심재가 쉽게 변형하면서 충격흡수율을 극대화 하여 하부판재의 변형을 최소화 하기 때문으로 생각할 수 있다. 즉 일반 판재와 달리 충격에너지의 일부가 트러스 구조의 붕괴에 의해 발생하며 이로 인해 심재의 두께가 감소하기 때문에 전체변형량을 크게 줄이면서도 충격흡수량은 크다. 따라서 내충격부재의 모순점인 충분한 변형을 통한 충격흡수량 증대와 최소변형을 통한 공간보호를 동시에 만족 할 수 있는 부재임을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 트러스 형 샌드위치 판재의 저속 충격거동을 규명하기 위하여 트러스형 샌드위치 판재 및 낙하충격시험기를 제작하고 여러조건에서 충격시험을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 샌드위치 판재의 충격흡수량은 상부 판재의 균열이 발생하는 시점에서 최대가 되며 이후 충격흡수량은 급격히 감소하였다.
- (2) 충격흡수율은 샌드위치 판재의 심재의 두께가 증가할수록 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이며 이는 정적 특성과 상이한 결과이다. 이를 통해 충격흡수량을 최대로 하는 적절한 두께비가 존재함을 확인하였으며 이론적

혹은 해석적으로 규명되어야 한다.

- (4) 트러스형 샌드위치 판재는 상대적으로 약한 내부구조가 붕괴하면서 충격에너지를 효율적으로 흡수한다.
- (5) 내부 구조가 완전히 붕괴하는 순간 트러스형 샌드위치 판재는 일반판재와 유사한 거동 특성을 보이며 그 시점을 샌드위치 판재의 충격한계를 결정하는 특이점이라 볼 수 있다. 또한 이 특이점을 이론 혹은 해석적으로 규명한다면 샌드위치 판재의 충격특성을 개선하는 잣대로 사용될 수 있다.
- (6) 유사한 무게를 가지는 일반판재와 비교를 통해 동일 변형량에 대해 충격흡수율은 160 %, 충격변형량은 76 % 수준으로 매우 우수한 충격부재임을 확인하였다.

한편 본 연구에서 수행된 충격시험은 심재의 국부적 변형만을 발생시킴을 확인하였다. 이는 심재의 변형에 의해 충격흡수가 효율적으로 이루어지는 샌드위치 판재의 충격특성을 충분히 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 시편의 경계조건을 변화시키거나 충격헤드의 크기를 증가시키는 등의 조건 변화가 필요하다.

본 연구에서 사용된 시편은 접착제를 통해 제작되었다. 그러나 충격흡수량에 대한 접착층의 영향은 고려되지 않았다. 이 역시 향후 비접착 방식의 시편제작 및 실험을 통해 영향 정도를 파악해야 할 것이다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 차세대핵심기술개발사업인 마이크로 첨단복제 생산시스템 개발사업의 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G., "Metal foams: a design guide," Butterworth, pp. 113-149, 2000.
2. Usilght., Advanced Materials & Processes, Pages 10, May-2002.
3. Hylite Presentation, <http://www.corusgroup->

- hylite.com.
4. Wicks, N. and Hutchinson, J. W., "Optimal truss plates," *International journal of solids and structures*, Vol. 38, pp. 5165-5183, 2001.
 5. Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Fabrication and static bending Test on ultra light inner Structured and bonded (ISB) Panel containing repeated inner pyramidal structures," *Korea society of precision engineering*, Vol. 22, Vol.6, pp. 175-182, 2005.
 6. Lim, T. S., "A study on the fatigue and impact characteristics of the mechanical joints for composite sandwich structures," Doctorial Theses, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 48-95, 2003.
 7. Besant, T., Davies, G. A. O. and Hitchings, D., "Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels," *Composites part A: Applied science and manufacturing*, Vol. 32, pp. 1189-1196, 2001.
 8. Radford, D. D., Fleck, N. A. and Deshpande, V. S., "The response of clamped sandwich beams subjected to shock," *International journal of impact engineering*, Vol. 32, pp. 968-987, 2006.
 9. KS D361, "Expanded metal," 1993.
 10. Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structure," *Composites science and technology*, pp. 2331-2343, 2003.
 11. Allen, H. G., "Analysis and design of structural sandwich panels," Pergamon Press, pp. 8-46, 1969.